聚丙烯电缆绝缘材料的耐压特性研究

何毅帆[1],谢 成[1],王境淋[2],赵 鹏[3],李 鹏[2],徐 曼[2],欧阳本红[3]

(1.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310000;2.西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049;3.中国电力科学研究院有限公司,湖北 武汉 430074)

摘 要:采用恒定应力法对交联聚乙烯(XLPE)和3种聚丙烯(PP)绝缘材料施加交流电压进行耐压试验,采用反幂模型作为电寿命模型来描述电场强度和击穿失效时间之间的关系,得到不同温度下各个材料的电压耐受指数。结果表明:3种PP的击穿场强显著高于XLPE,30 ℃时共混PP样品的击穿场强为101.8 kV/mm,而XLPE样品的击穿场强为61.5 kV/mm。PP的老化稳定性也优于XLPE,90 ℃时共混PP样品的击穿场强相较30 ℃时下降约4.1%,而XLPE下降约15.3%。不同配方的PP材料之间差异不明显。研究结果为PP在电力电缆中的应用及其电应力作用下的寿命评估提供参考。

关键词:聚丙烯绝缘材料;电老化;耐压实验;恒定应力法;电压耐受指数

中图分类号:TM215.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0006-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.002

Research on Voltage Withstand Characteristics of Polypropylene Cable Insulation Materials

HE Yifan[1], XIE Cheng[1], WANG Jinglin[2], ZHAO Peng[3], LI Peng[2], XU Man[2], OUYANG Benhong[3]

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co. , Ltd. , Hangzhou 310000, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. China Electric Power Research Institute Co. , Ltd. , Wuhan 430074, China)

Abstract: Alternating-current voltage withstand tests were conducted on cross-linked polyethylene (XLPE) and three types of polypropylene (PP) insulating materials using the constant stress method. The inverse power model was adopted as the electrical lifetime model to describe the relationship between electric field strength and breakdown failure time, and the voltage endurance indices of each material at different temperatures were obtained. The results showed that the breakdown field strengths of the three PP materials were significantly higher than that of XLPE. At 30 ℃, the breakdown field strength of the blended PP sample was 101.8 kV/mm, whereas that of the XLPE sample was 61.5 kV/mm. The aging stability of PP was also superior to that of XLPE. At 90 ℃, the breakdown field strength of the blended PP sample decreased by approximately 4.1% compared with that at 30 ℃, while that of XLPE decreased by approximately 15.3%. The differences among PP materials with different formulations were not significant. These findings provide a reference for the application of PP in power cables and the lifetime assessment under electrical stress.

Keywords: Polypropylene insulating material; Electrical aging; Withstand voltage test; Constant stress method; Voltage tolerance index

目前,全国用电量逐年增长,电力电缆作为城市电网的重要组成部分,其用量迅速增加。交联聚乙烯(XLPE)

收稿日期Submitted date 2025-08-19;修回日期Revised date 2025-10-08;录用日期Accepted date 2025-11-29

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5500-202319121A-1-1-ZN)

联系人,yifan_he@126.com

引用本文:何毅帆,谢成,王境淋,等.聚丙烯电缆绝缘材料的耐压特性研究[J].塑料科技,2026,54(8):6-11.

Citation: HE Y F, XIE C, WANG J L, et al. Research on voltage withstand characteristics of polypropylene cable insulation materials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 6-11.

凭借优异的电、热和机械性能[1]，成为挤出型电力电缆绝缘材料的主流选择。然而，XLPE电缆在生产过程中需要进行交联和脱气处理，生产周期长，能耗高，交联副产物会对电气性能产生不良影响[2]。此外，XLPE电缆生产中的余料及生命周期结束后的废料难以回收再利用，采用焚烧、裂解、填埋等方式不仅会消耗大量能源，还会对环境造成严重负面影响[3]。

聚丙烯(PP)相较于XLPE具有更高的熔点，热变形温度通常在90 ℃以上，在高温环境下仍能保持良好的力学性能，绝缘性能优异，是一种优良的电缆绝缘材料[4]。PP在制备过程中无须交联，可大幅简化电缆生产工序，并便于回收再利用[5]。在相同绝缘厚度下，PP绝缘电缆具备在更高电压等级、更高工作温度和更大输送容量方面的应用潜力[6-7]。因此，PP在生产和应用方面具有独特优势，符合高输送容量环保电力电缆的绿色低碳发展需求[8-9]。

目前，对PP绝缘老化的评价和寿命评估多集中于热氧老化方面。赵鹏等[10]研究发现，改性PP绝缘料在热氧老化过程中的宏观特征与XLPE绝缘料变化趋势一致。老化初期以重结晶过程为主，老化后期以链断裂过程为主，但由于二者熔点不同，老化机理存在差异。樊林禛等[11]研究发现，氧气沿非晶区向试样内部的扩散是影响PP热氧老化性能的关键因素。张凯等[12]研究发现，对PP进行接枝改性可提高其稳定性，有效阻隔氧气进入与扩散，从而显著提升抗热氧老化性能。目前，PP热氧老化的评价多基于机械性能、微观产物或扩散限制氧化效应等单一性能参数[13]。而ZHANG等[14]则提出利用人工神经网络建立多个参数与老化时间的关联，以预测聚合物的老化寿命。周远翔等[15]研究表明，电老化是指在电场作用下，电致发光效应和热电子撞击聚合物分子链，破坏其晶体结构，使绝缘材料的电气与机械性能发生不可逆劣化，最终丧失绝缘功能。针对电缆绝缘电老化，可采用击穿电压对比法、介质损耗因数法和直流泄漏电流法等定量分析剩余寿命[16-17]。但目前尚无理论公式对绝缘材料电老化进行物理描述，文献中多采用反幂模型和指数型模型来表征其老化规律[18]。已有报道显示，交流XLPE电缆绝缘样品的电压耐受指数(n)为9~25[19]。王国栋等[20]对反幂模型进行修正，实验得到当电场强度(E)≥32 kV/mm时，XLPE样片的n=20.73；当E<32 kV/mm时，n=28.45。刘霞等[21]实验得到，当直流XLPE电缆绝缘施加的E>120 kV/mm、电压耐受时间<1.45 h时，n=15.38；当E<120 kV/mm、电压耐受时间>1.45 h时，n=20.19。另一种描述电缆绝缘电老化的寿命预测模型为指数型模型[22-24]。部分文献依据IEC 62539:2007，采用Weibull分布判定绝缘老化实验数据的有效性并描述电老化失效时间[25-27]，但针对PP的耐压实验电老化评价尚未见报道。

电应力施加方法主要包括恒定应力法和步进应力法。恒定应力法结果准确，失效机理明确，但耗时长，数据分散性大，需要借助Weibull分布统计方法减小分散性；步进应力法则耗时短，数据分散性低，工程适用性强，但对实验参数敏感，需要验证其等效性[28]。本文采用恒定应力法对3种PP绝缘进行耐压实验，以XLPE为参考样品，通过Weibull分布计算4种材料在不同温度下的n，为不同PP绝缘的耐压寿命研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

共混PP绝缘材料(#1)，SSH，江苏上上电缆集团有限公司；共聚PP绝缘材料(#2)，YHC，中国石化燕山石化公司；添加1035抗氧剂的共聚PP绝缘材料(#3)，YHC-1035，中国石化燕山石化公司；中压35 kV XLPE绝缘材料(#4)，YJ-35，中国石化燕山石化公司。

1.2 仪器与设备

差示扫描量热仪(DSC)，822e，瑞士Mettler公司；全自动工频耐压控制箱，HTGY-5kVA，武汉市华天电力自动化有限责任公司；球-球电极，直径为25 mm，武汉利锋金机械加工厂；可调温烘箱，RL 800，常熟市环境试验设备有限公司。

1.3 样品制备

PP样品的制备流程：将PP粒料在210 ℃、15 MPa的条件下热压10 min，成型后保压冷却至室温，得到厚度为0.2 mm、尺寸为10 cm×10 cm的方形薄片试样。

XLPE样品的制备流程：将聚乙烯(PE)粒料于175 ℃条件下预热5 min，加压至15 MPa，热压10 min，使其完成交联，成型后保压冷却至室温，得到厚度为0.2 mm、尺寸为10 cm×10 cm的方形薄片试样。

对试样进行透光观察以检测其均匀性，筛选出透光均匀且无明显缺陷的试样进行工频击穿和耐压实验。图1为4种材料样片实物。

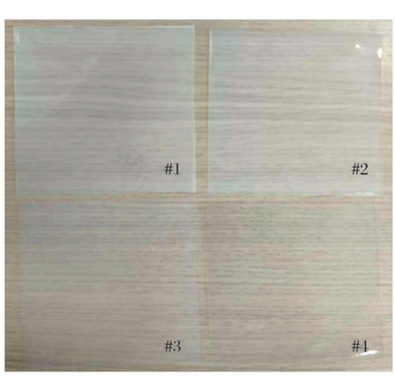


图1 4种材料样片实物

Fig.1 Sample physical objects of four materials

1.4 性能测试与表征

DSC测试：在氮气氛围中，以10 ℃/min的速率从40 ℃升温至220 ℃，以消除材料的热历史，保温5 min。然后以相同的速率从220 ℃降温至40 ℃，获得试样的结晶

曲线。40 ℃恒温5 min后，再将试样以相同的速率从40 ℃升温至220 ℃，获得熔融曲线。结晶度(X_c)计算公式为：

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0}\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中：X_c为样品的结晶度，%；ΔH_m为样品的熔融焓，J/g；ΔH_m^0为完全结晶样品的熔融焓，PP取207 J/g，XLPE取287.3 J/g[29]。

击穿实验：对烘箱、样品、绝缘油和球-球电极共同进行预热，直至温度分别达到30、50、90 ℃且保持稳定。升压速率为1 kV/s，直至样品被击穿，在每个温度条件下对每种材料进行7次测试，记录所得击穿电压，取平均值，作为该材料在该温度下的击穿电压，以此计算样品的击穿场强(E_b)。图2为击穿实验平台。

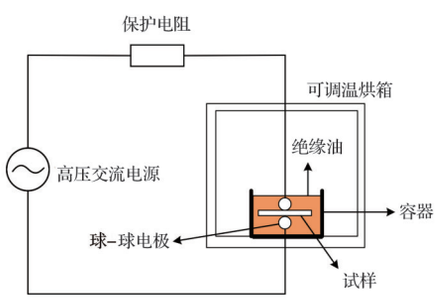


图2 击穿实验平台

Fig.2 Breakdown test platform

耐压实验：耐压实验的装置与击穿实验相同。采用恒压加速老化实验方法，即持续给样品保持恒定实验老化场强直至材料击穿失效。将7对球-球电极并联接入电路并放置样品，分别在30、50、90 ℃对这4种材料施加其相应E_b的80%、85%和90%，直至7片材料全部被击穿，记录每片样品对应的击穿时间。对击穿时间进行两参数Weibull分布统计，以各温度下击穿概率为63.2%对应的时间作为该材料的击穿失效时间。

2 结果与讨论

2.1 材料的DSC分析

对4种材料进行DSC测试。图3为4种材料的DSC熔融曲线，表1为4种材料的熔点和X_c。从图3和表1可以看出，#1样品熔点最高，为164.4 ℃，#2和#3样品的熔点比较接近，3种PP材料的熔点均显著高于XLPE。#1样品为弹性体共混PP，其结晶受弹性体影响，导致X_c较小。未加入抗氧剂的#2样品X_c高于加入抗氧剂的#3样品。原因为抗氧剂分子阻碍PP分子链向晶格迁移，抑制结晶。两种共聚体系的PP材料的X_c均高于共混PP，3种PP的X_c均高于XLPE。

2.2 不同温度下材料的E_b分析

在30、50、90 ℃下对这4种绝缘材料样品进行击穿实验，计算得到4种材料的E_b，记录击穿时间。表2为不同温度下4种材料的E_b。从表2可以看出，3种PP绝缘材料的E_b比较接近。#1样品在30 ℃时的E_b最高，为101.8 kV/mm。而XLPE绝缘材料的E_b显著低于PP，为61.5 kV/mm。这是由于结晶聚合物的E_b受结晶度的影响，PP的熔点和X_c均高于XLPE，分子链排列紧密，自由体积小，抑制载流子迁移，因此PP的E_b高于XLPE。随着测试温度的升高，4种绝缘材料的E_b均有所降低，其中XLPE的E_b下降最明显，当温度为90 ℃时，E_b为52.1 kV/mm，相较于30 ℃时下降约15.3%。3种PP绝缘材料E_b随温度下降很小，最大仅为4.1% (#1)。由此可以看出，PP绝缘具有比XLPE更好的E_b温度稳定性。

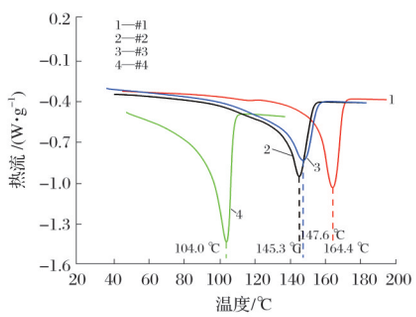


图3 4种材料的DSC熔融曲线

Fig.3 DSC melting curves of four materials

表1 4种材料的熔点和X_c

Tab.1 Melting points and X_c of four materials

样品	熔点/℃	X_c/%
#1	164.4	24.0
#2	145.3	32.1
#3	147.6	27.7
#4	104.0	18.3

表2 不同温度下4种材料的E_b

Tab.2 E_b of four materials at different temperatures

单位：kV·mm^{-1}

样品	E_b		
	30 ℃	50 ℃	90 ℃
#1	101.8	98.8	97.6
#2	100.8	100.5	99.8
#3	98.1	95.4	97.4
#4	61.5	65.9	52.1

2.3 不同温度下材料的击穿失效时间分析

在30、50、90 ℃下对这4种绝缘材料样品进行耐压实验，记录样品被击穿所用时间。图4~图7分别为不同E_b和温度下#1样品、#2样品、#3样品和#4样品的Weibull分布。以此计算得到4种绝缘材料在不同E_b和温度下的击穿失效时间，结果如表3所示。从表3可以看出，实验的击穿失效时间分布基本符合Weibull分布。总体趋势为温度越高、电场强度越高时击穿失效时间越短。30 ℃时，4种材料的外施场强从80% E_b升高至90% E_b时，击穿失效时间分别下降94.7%、92.0%、93.9%和96.6%；90 ℃时则分别下

降98.2%、94.4%、98.1%和90.5%；施加80% E_b时，#1、#2、#3样品在90 ℃时的击穿失效时间相较于30 ℃分别降低82.85%、74.35%和70.71%；施加90% E_b时，这3种材料的击穿失效时间分别降低94.20%、82.22%和91.15%。可能是因为较高的外施场强和温度使材料局部过热，从而引发热击穿。

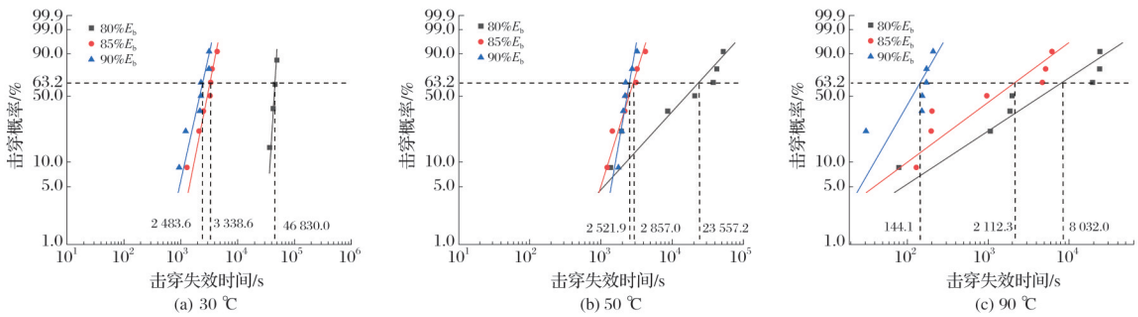


图4 不同E_b和温度下#1样品的Weibull分布

Fig.4 Weibull distribution of sample #1 under different E_b and temperatures

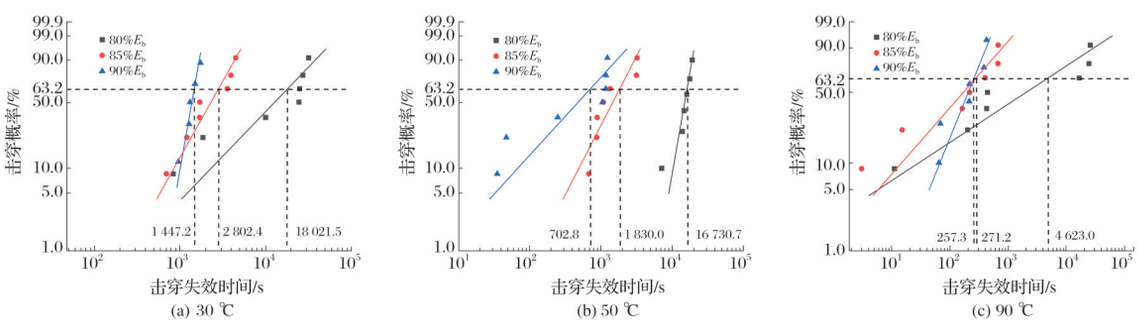


图5 不同E_b和温度下#2样品的Weibull分布

Fig.5 Weibull distribution of sample #2 under different E_b and temperatures

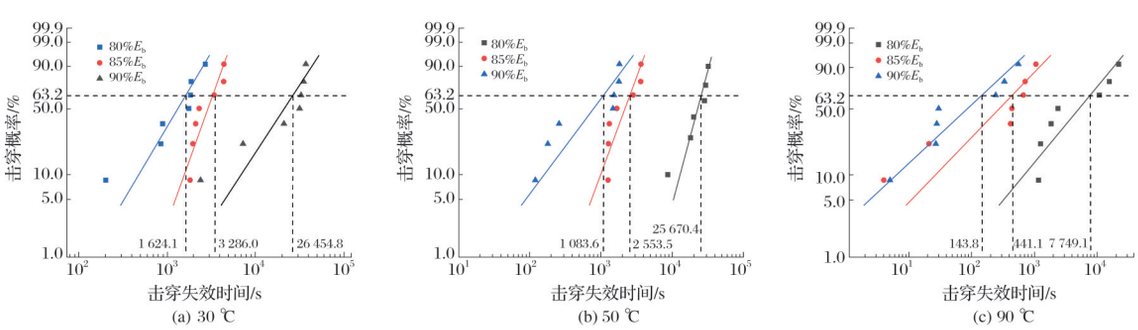


图6 不同E_b和温度下#3样品的Weibull分布

Fig.6 Weibull distribution of sample #3 under different E_b and temperatures

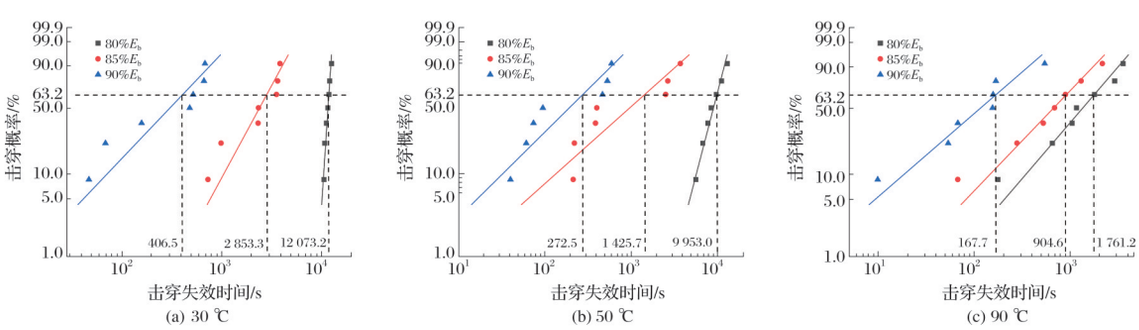


图7 不同E_b和温度下#4样品的Weibull分布

Fig.7 Weibull distribution of sample #4 under different E_b and temperatures

从3种PP材料的失效时间可以看出，#3样品在各个条件下的击穿失效时间均明显高于#2样品。出现这一现象的原因是抗氧剂的加入会抑制PP局部高温导致的结构破坏，从而提高材料的绝缘性能。#1样品在各个条件下的击穿失效时间均远高于另外两种PP样品，说明不同的材料配方会对PP的耐压寿命产生一定影响。但在90 ℃以

内影响较小，说明熔点更加稳定。对比PP样品和XLPE样品的击穿失效时间可以发现，各个电压等级下的PP材料的击穿失效时间均显著高于XLPE。由此可以看出，PP绝缘具有比XLPE更好的耐电压能力。

表3 不同E_b和温度下4种材料的击穿失效时间

Tab.3 Breakdown failure time of four materials at different E_b and temperatures

样品	击穿场强/(% E_b)	击穿失效时间/s		
		30 ℃	50 ℃	90 ℃
#1	80	46 830.0	23 557.2	8 032.0
	85	3 338.6	2 857.0	2 112.3
	90	2 483.6	2 521.9	144.1
	100	20.4	19.8	19.5
#2	80	18 021.5	16 730.7	4 623.0
	85	2 802.4	1 830.0	271.2
	90	1 447.2	702.8	257.3
	100	20.2	20.1	20.0
#3	80	26 454.8	25 670.4	7 749.1
	85	3 286.0	2 553.5	441.1
	90	1 624.1	1 083.6	143.8
	100	19.6	19.1	19.5
#4	80	12 073.2	9 953.0	1 761.2
	85	2 853.3	1 425.7	904.6
	90	406.5	272.5	167.7
	100	12.3	13.2	10.4

2.4 不同温度下材料的n分析

本文采用反幂模型来计算材料的n，反幂模型表达式为：

$$t=CE^{-n} \tag{2}$$

式(2)中：E为外加电场，kV/mm；t为在电场E作用下的击穿时间，s；C为由绝缘系统或材料决定的常数；n为电压耐受指数，是表征绝缘电压耐受特性的关键参数。n越大说明绝缘材料对电应力的耐受程度越高[30]。

为了方便计算，常将其改写为对数形式，即：

$$\ln t=-n\ln E+\ln C \tag{3}$$

由反幂模型可知，$\ln E$与$\ln t$呈线性关系，因此可以根据上文得到的结果通过最小二乘拟合得到材料的n。

表4为不同温度下4种材料的n。从表4可以看出，XLPE的n与引言中文献[19]的报道相符，因此本实验具有一定的可靠性。温度为30 ℃和50 ℃时，4种材料的n较为接近，当温度升高至90 ℃时，#1和#3样品的n均显著高于#4样品。随着测试温度的升高，4种材料的n均有所降低，其中XLPE下降最明显，约为24.0%。可见，PP绝缘的老化稳定性显著优于XLPE。对比#2和#3样品可以看出，各个温度下#3样品的n均高于#2样品。添加抗氧剂后，30 ℃和90 ℃时，n分别提高5.03%和12.33%。因此，添加抗氧剂可有效提高PP材料的耐电寿命。

推出4种材料在反幂模型下的寿命公式，计算可得，当电老化寿命为30年时，30 ℃时XLPE可耐受的电场强度约为34.5 kV/mm，PP可耐受的电场强度约为57.9 kV/mm，比XLPE提升67.83%；90 ℃时XLPE可耐受的电场强度约为24.3 kV/mm，PP可耐受的电场强度约为51.3 kV/mm，比XLPE提高111.11%。可见，当温度升高时，PP和XLPE可长期耐受的场强均降低，但PP的高温耐电性能明显优于XLPE。

表4 不同温度下4种材料的n

Tab.4 n of four materials at different temperatures

样品	n		
	30 ℃	50 ℃	90 ℃
#1	30.4	30.5	28.0
#2	29.8	29.3	22.7
#3	31.3	30.7	25.5
#4	31.3	29.5	23.8

3 结论

本文研究共混PP、共聚PP、添加抗氧剂的共聚PP和

XLPE 4种绝缘材料在不同温度下的耐电性能。匀速升压击穿测试结果表明，相同温度下，3种PP绝缘材料的E_b比较接近，而XLPE绝缘材料的E_b显著低于PP。随着温度的升高，4种绝缘材料的E_b均有所降低，但PP绝缘材料的高温E_b下降幅度更小，表明PP在电缆工作温度范围内具有比XLPE更好的E_b温度稳定性，这是由PP绝缘的高X_c和高熔点决定的。根据耐压实验计算得到4种材料的n可以看出，温度对PP绝缘n的影响小于XLPE，添加抗氧剂可提高PP绝缘电压耐受的稳定性。由寿命预测公式可知，当电缆的预期寿命为30年时，满负荷工作状态下(90 ℃) PP电缆的长期可耐受场强为51.3 kV/mm，比XLPE高111.11%，具有比XLPE电缆更好的可靠性。

参考文献

[1] 寻世强, 杨云梦, 赵健军, 等. XLPE/SiO_2纳米复合材料水树枝老化特性研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(1): 33-37.

[2] 张宇星, 王忠, 张洪宇. 聚丙烯绝缘材料在中高压电缆中的应用[J]. 环境技术, 2025, 43(6): 63-68.

[3] 李亚莎, 庞梦昊, 王佳敏, 等. 纳米碳酸钙接枝硅烷偶联剂改性聚丙烯的分子动力学模拟[J]. 塑料科技, 2024, 52(8): 7-11.

[4] 陈鸿, 赵健康, 黄凯文, 等. 不同改性聚丙烯电缆绝缘料的结构与性能对比分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 233-239.

[5] 赵鹏, 欧阳本红, 宁昕, 等. 乙烯共聚改性聚丙烯电缆绝缘料的结构-性能分析[J]. 高电压技术, 2025,51(6): 2662-2671.

[6] 高振军, 李金堂. 105 ℃中压聚丙烯绝缘电力电缆的研制[J]. 电线电缆, 2024, 67(4): 20-24.

[7] 欧阳本红, 赵鹏, 黄凯文, 等. 热塑性聚丙烯电缆料研究进展评述[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 907-919.

[8] 杜伯学, 侯兆豪, 徐航, 等. 高压直流电缆绝缘用聚丙烯及其纳米复合材料的研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2769-2780.

[9] 郑阳, 刘美兵, 张斌, 等. 高压电缆用聚丙烯绝缘料的研究与开发[J]. 上海塑料, 2025, 53(3): 32-36.

[10] 赵鹏, 欧阳本红, 黄凯文, 等. 不同改性聚丙烯电缆绝缘料热氧老化特性和选型[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2642-2649.

[11] 樊林禛, 李琦, 袁浩, 等. 接枝对聚丙烯绝缘材料热氧老化的影响及机理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4227-4237.

[12] 张凯, 刘爱民, 段玉兵, 等. 热老化对聚丙烯电缆绝缘料聚集态结构的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 55-60.

[13] 李雪娇, 姜宁, 刘鑫浩, 等. 聚烯烃热氧老化机理及寿命预测研究进展[J]. 化工进展, 2025, 44(9): 5075-5091.

[14] ZHANG Z, FRIEDRICH K. Artificial neural networks applied to polymer composites: A review[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(14): 2029-2044.

[15] 周远翔, 黄继宇, 陈健宁, 等. 低频电压下XLPE绝缘材料电老化性能研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(1): 1-10.

[16] 喻岩珑, 李晟, 孙辉, 等. XLPE电缆绝缘老化与剩余寿命评估的试验方法[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(4): 26-29.

[17] 师青梅, 常宇. XLPE 电缆绝缘残余寿命评估的初步研究[J]. 科技创新导报, 2009, 6(2): 4.

[18] 廖雁群, 冯冰, 罗潘, 等. 反幂定律应用于高压电缆寿命设计的研究进展[J]. 绝缘材料, 2016, 49(3):1-6.

[19] 刘霞, 于钦学, 钟力生, 等. 高压XLPE电缆绝缘*V-t*特性研究综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(10): 57-63.

[20] 王国栋, 周凯, 李原, 等. 基于失效时间统计特性的交联聚乙烯电寿命模型修正[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 1042-1050.

[21] 刘霞, 于钦学, 刘明昊, 等. 160 kV 直流XLPE电缆绝缘的直流*E-t*特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1):130-135.

[22] RAMU T S. On the estimation of life of power apparatus insulation under combined electrical and thermal stress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985, EI-20(1): 70-78.

[23] BRANCATO E L. A pathway to multifactor aging[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(5): 820-825.

[24] CYGAN P, LAGHARI J R. Models for insulation aging under electrical and thermal multistress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(5): 923-934.

[25] International Electrotechnical Commission. Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data: IEC 62539: 2007 (IEEE Std 930-2004)[S]. Geneva: IEC, 2007.

[26] LAWLESS J F. Statistical models and methods for lifetime data[M]. Hoboken: Wiley, 2002.

[27] CYGAN P, KRISHNAKUMAR B, LAGHARI J R. Lifetimes of polypropylene films under combined high electric fields and thermal stresses[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 619-625.

[28] 李仲轩. XLPE绝缘电寿命模型的步进应力试验方法及累积损伤量影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.

[29] 朱鹤翔, 孙小杰, 梁文斌. 超高分子量聚乙烯/高密度聚乙烯共混物的低温冲击研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(1): 45-48.

[30] 李宁一. XLPE绝缘直流电压耐受指数步进应力评估方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.